DEUX CAS D'ÉTANCHÉITÉ DE BARRAGES EN AMÉRIQUE DU SUD PAR GÉOMEMBRANES BITUMINEUSES

TWO CASE HISTORIES OF DAMS WATERPROOFING IN SOUTH AMERICA WITH BITUMINOUS GEOMEMBRANES

Bertrand BREUL[1], Terry ELDRIDGE[2]
[1] *Soprema Inc., Québec (QC), Canada*
[2] *Golder Associates Ltd, Burnaby (BC), Canada*

RÉSUMÉ - Cette communication présente deux études de cas qui décrivent des barrages destinés à assurer l'alimentation en eau de diverses activités réalisées en aval pendant la saison sèche. Le premier cas concerne un barrage en terre et en enrochements d'une hauteur de 30 m. Le second exemple est un barrage en béton compacté (BCR) d'une hauteur de 23 m. Dans le but de freiner l'infiltration d'eau, une géomembrane bitumineuse, utilisée comme barrière à faible perméabilité, a été installée sur la face amont des deux ouvrages. En outre, ce texte présente sommairement la conception générale des ouvrages et fournit des détails sur les travaux d'installation des géomembranes bitumineuses et les procédés de contrôle de la qualité.
Mots clés : Barrage – géomembrane - bitumineuse – mine – hydraulique.

ABSTRACT – This article presents two case histories of dams built to ensure the supply of water for activities to be carried out downstream during the dry season. The first case is a 30 m high earth and rockfill dam. The second example is a 23 m high compacted concrete (RCC) dam. A bituminous geomembrane (BGM) was used in both dams as a low permeability, upstream face element for the control of water seepage. This paper briefly presents the general design of the dams and provides details of the BGM's installation work, quality control process.
Keywords: Dam – geomembrane – bituminous – mine – hydraulic**.**

1. Introduction

Le premier cas concerne un barrage en terre et en enrochements d'une hauteur de 30 m dont la capacité atteint près de 67.000 m^3. Cet ouvrage a pour fonction de stocker l'eau traitée. Il se trouve à une altitude d'environ 2.000 m où les températures ambiantes se situent entre 18 et 25°C. Le barrage, conçu dans le but de stocker l'eau traitée d'un bassin de résidus, comprend des géomembranes bitumineuses en vue de freiner l'infiltration d'eau contaminée.

Le second cas est constitué d'un barrage en béton compacté au rouleau d'une hauteur de 23 m dont la capacité atteint près de 600.000 m^3. Il se trouve à une altitude d'environ 1.000 m où les températures ambiantes vont de -5 à 25°C. Cette structure a pour but de stocker de l'eau claire pour alimenter des activités agricoles. La conception comprend une géomembrane bitumineuse et des géomembranes en polyéthylène basse densité linéaire (PEBD) en vue d'assurer l'étanchéité de la face amont et de prévenir les fuites souterraines.

2. Description des projets

2.1. Cas 1

2.1.1. Description générale

En coupe transversale, la partie amont de ce barrage est constituée d'un sol compacté composé d'argile et de gravier. La pente de cette face amont est de 1(V) : 2(H) soit 27°. En son milieu, le barrage comprend une couche de transition construite avec un gravier à composition granulométrique très stricte. Cette couche de gravier, qui a une pente de 2(V) : 1(H) soit 63°, a une largeur horizontale de 2 m et traverse le barrage du fond à la crête. En ce qui concerne la face aval, dont la pente est de 1(V) : 1,6(H) soit 32°, des roches à granulométrie sélectionnée ont été compactées. La fondation du barrage repose sur le substratum étanche qui a été atteint après de profondes excavations dans le sol naturel.

Au pied amont du barrage, un voile d'injection a été construit le long de tout le périmètre du barrage et jusqu'à la crête des deux culées. Une tranchée a été excavée en vue de loger la plinthe qui lie le voile d'injection à BGM pour assurer un contrôle approprié de l'infiltration d'eau à travers le barrage et sa fondation.

Au pied aval du barrage, des puits de surveillance et un bassin collecteur des eaux d'infiltration ont été installés afin de permettre le contrôle de la qualité de l'eau et de son niveau.

2.1.2. Coupe transversale
La figure 1 illustre une coupe transversale typique du barrage et présente tous les éléments structuraux susmentionnés.

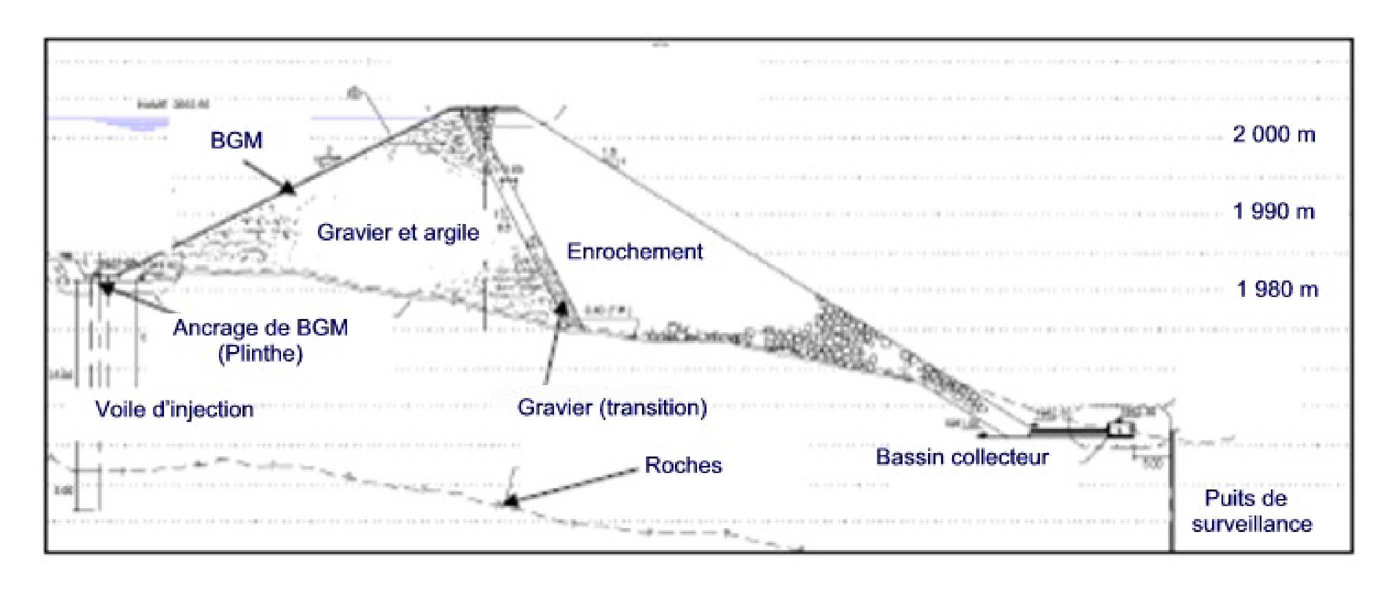


Figure 1. Coupe transversale typique du barrage, cas 1

2.2. Cas 2

2.2.1. Description générale
Le second cas est un barrage en béton compacté au rouleau (BCR) d'une hauteur de 23 m. Une géomembrane bitumineuse a été utilisée comme barrière imperméable sur la face amont. La prévention de l'infiltration d'eau sous le barrage et ses culées est assurée par une profonde tranchée parafouille dotée d'un géomembrane en PEBD. La tranchée parafouille a été excavée jusqu'au substratum rocheux altéré trouvé à une profondeur de 15 m sous la fondation du barrage. La résistance à la compression du béton utilisé pour le barrage est de 4,8 MPa à 180 jours. Celui-ci a été mis en place et compacté par couche de 30 cm. Les faces amont et aval du barrage ont la même pente, soit 1(V) : 0,7(H) soit 55°. Toutefois, la face amont a reçu un traitement spécial en vue de l'installation de la géomembrane bitumineuse. La section au centre du barrage comprend la tuyauterie de refoulement nécessaire aux activités d'entretien.

En aval, un déversoir et un canal à l'air libre servent à transporter l'eau jusqu'au lit de l'ancienne rivière.

Le pied amont du barrage comprend une tranchée parafouille dotée d'un géomembrane en PEBD. Cette dernière est remplie de matériaux de remblai aléatoires sur le dessus et de matériaux d'étanchéité au fond.

À 10 m en avant du barrage et en parallèle à la structure, une petite tranchée remplie de béton permet le joint spécial entre les géomembranes PEBD et BGM.

La fondation du barrage repose sur la terrasse fluviatile. Les travaux d'excavation nécessaires pour sa construction ont atteint l'horizon souhaité, c'est-à-dire la profondeur où la résistance et la densité du sol granulaire requises ont été localisées.

2.2.2. Coupe transversale
La figure 2 présente une coupe transversale typique du barrage, y compris les systèmes d'étanchéité.

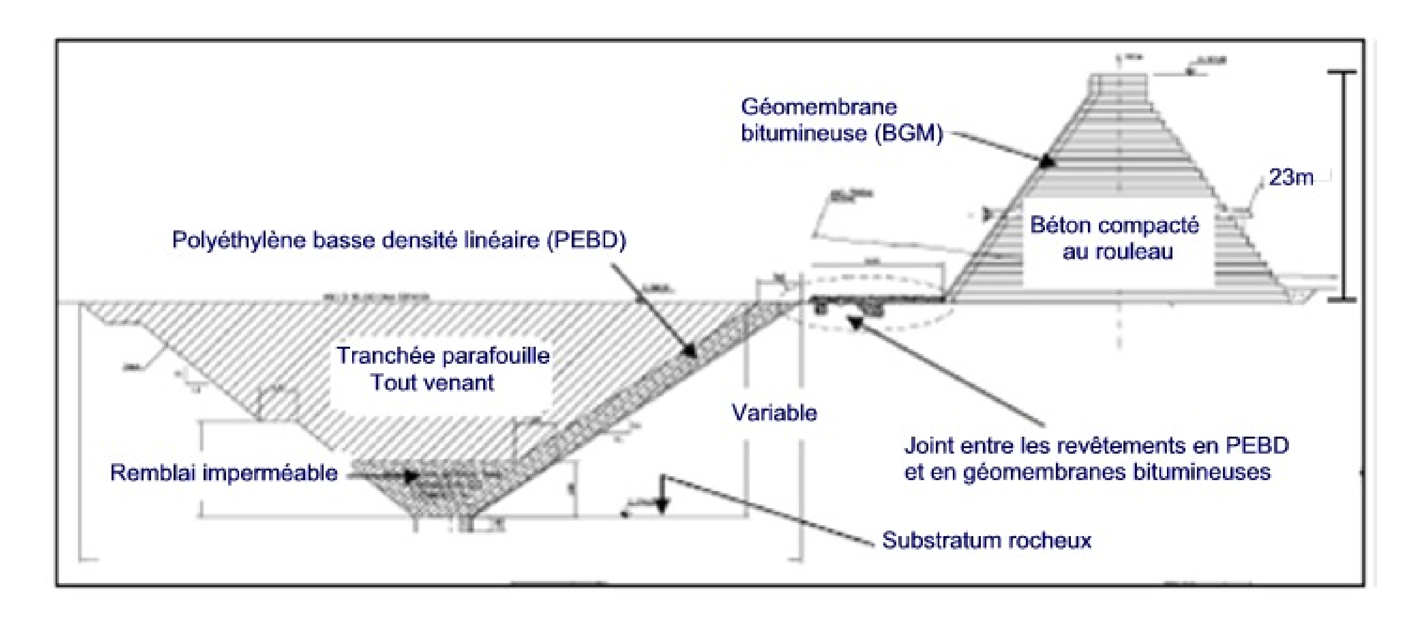


Figure 2. Coupe transversale typique du barrage, cas 2

3. Travaux préparatoires

3.1. Cas 1

3.1.1. Préparation de la pente et de la surface.
La préparation de la surface de la face amont du barrage a été très simple à réaliser et n'a pas occasionnée de coûts importants. Nous avons eu recours à de l'équipement d'excavation ordinaire pour niveler et lisser la surface de gravier et d'argile compactée.

Au pied du barrage, la dalle de béton est arrondie à la fin de la plinthe afin de fournir un joint lisse entre les surfaces de gravier et d'argile compactées. Cet arrondi assure également une transition douce avec la géomembrane bitumineuse et supprime les arêtes vives qui pourraient abimer l'étanchéité en cas de tassements différentiels.

Les figures 3 et 4 présentent des vues générales du barrage avant et après l'installation de la géomembrane bitumineuse. La figure 3 montre la structure du parafouille sur laquelle le géomembrane a été appliqué ainsi que la surface lisse de la face amont qui a été préparée pour recevoir les géomembranes



Figure 3. Face amont du barrage, cas 1 – Avant installation



Figure 4. Face amont du barrage, cas 1 – Après installation

3.2. Cas 2

3.2.1. Préparation de la pente et de la surface
La préparation de la surface de la face amont du barrage a consisté à faire disparaître les irrégularités du béton au moyen de mélanges spéciaux. Cette étape a permis d'obtenir une surface suffisamment lisse pour recevoir les géomembranes bitumineuses.

Les premiers 50 cm de la face amont du barrage ont été construits avec du béton conventionnel (fc_{180} = 6 Mpa pour un béton âgé de 180 jours). Des talocheuses-lisseuses ont été utilisées pour étendre le béton de façon à assurer une surface lisse pour la mise en œuvre de la géomembrane.

Chaque lé de BGM c.à.d. transversalement tous les 5.10 m, a été fixé de façon á prévenir son soulèvement en raison des forces de succion du vent et pour limiter les infiltrations dues à un accident (tronc d'arbre). A noter que dans ce cas, *la géomembrane reste exposée*.

Un grand nombre de travaux de réparation sur le béton devant recevoir BGM ont été nécessaires pour éliminer les irrégularités qui excédaient 5 cm et les autres types d'imperfections, notamment les petites cavités sur la surface du béton. La figure 5 montre les travaux de réparation effectués pour régulariser la surface.



Figure 5. Face amont et détails des réparations, cas 2

3.2.2. Primer d'accrochage avant soudure de BGM sur béton
Un apprêt à base de bitume modifié (mélange de solvant et de bitume) a été utilisé et appliqué à l'extrémité des lés de géomembrane bitumineuse tous les 5,10 m sur 30 cm.

Après environ 4 heures pour permettre l'évaporation du solvant, l'accrochage BGM/béton a été réalisé par thermo-fusion par chalumeau. Par la suite, des soudures ont été effectuées sur 20 cm. entre les lés de BGM.

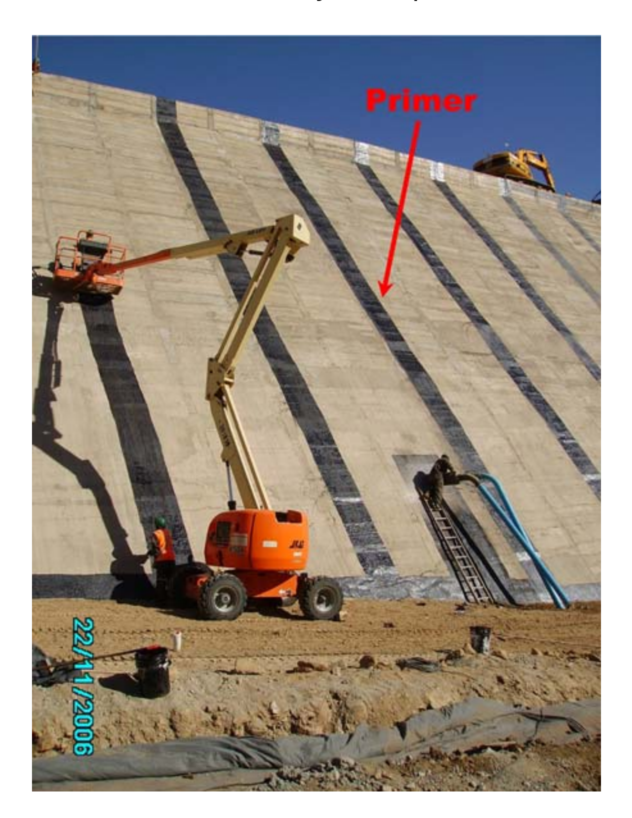


Figure 6. Détails de l'imprégnation de l'émulsion, cas 2

4. Installation

4.1. Cas 1

4.1.1. Type de géomembrane

Une géomembrane bitumineuse de 4,80 mm d'épaisseur, fabriquée en France, par imprégnation d'un géotextile de 300 gr/m², a été utilisée. Ses propriétés principales sont indiquées dans le tableau I.

Tableau I. Propriétés de la géomembrane NTP3 utilisée

Propriété	Méthode d'essai	Valeur
Épaisseur (mm)	ASTM D 5199-01	4,80
Sollicitation longitudinale à la rupture (kN/m)	ASTM D 4073	32,0
Sollicitation transversale à la rupture (kN/m)	ASTM D 4073	30,0
Résistance au poinçonnement statique (N)	ASTM D 4833	614
Allongement longitudinal à la rupture (%)	ASTM D 3083	84

4.1.2. Pose, soudure et détails de construction

Une des caractéristiques de la fixation de BGM en pied de barrage (illustrée à la figure 7) est que des boulons d'acier et des plaques en acier inoxydable ont été utilisées pour fixer les lés de BGM au béton de la plinthe à l'extrémité de la structure après soudure de ces lés à la poutre béton. La figure 7 montre les détails du système d'ancrage qui assure une étanchéité parfaite du système.

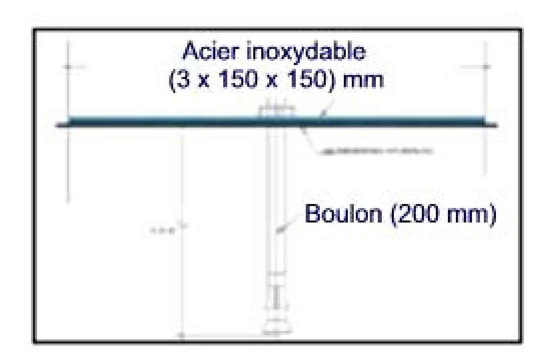


Figure 7. Détails du boulon, cas 1

L'autre point à retenir quant à la fixation de la géomembrane est l'importance d'une transition douce entre la dalle de béton de la structure de la plinthe et la surface du barrage pour assurer un angle très obtus. Ainsi, on minimise toute concentration possible de contrainte (figure 8).

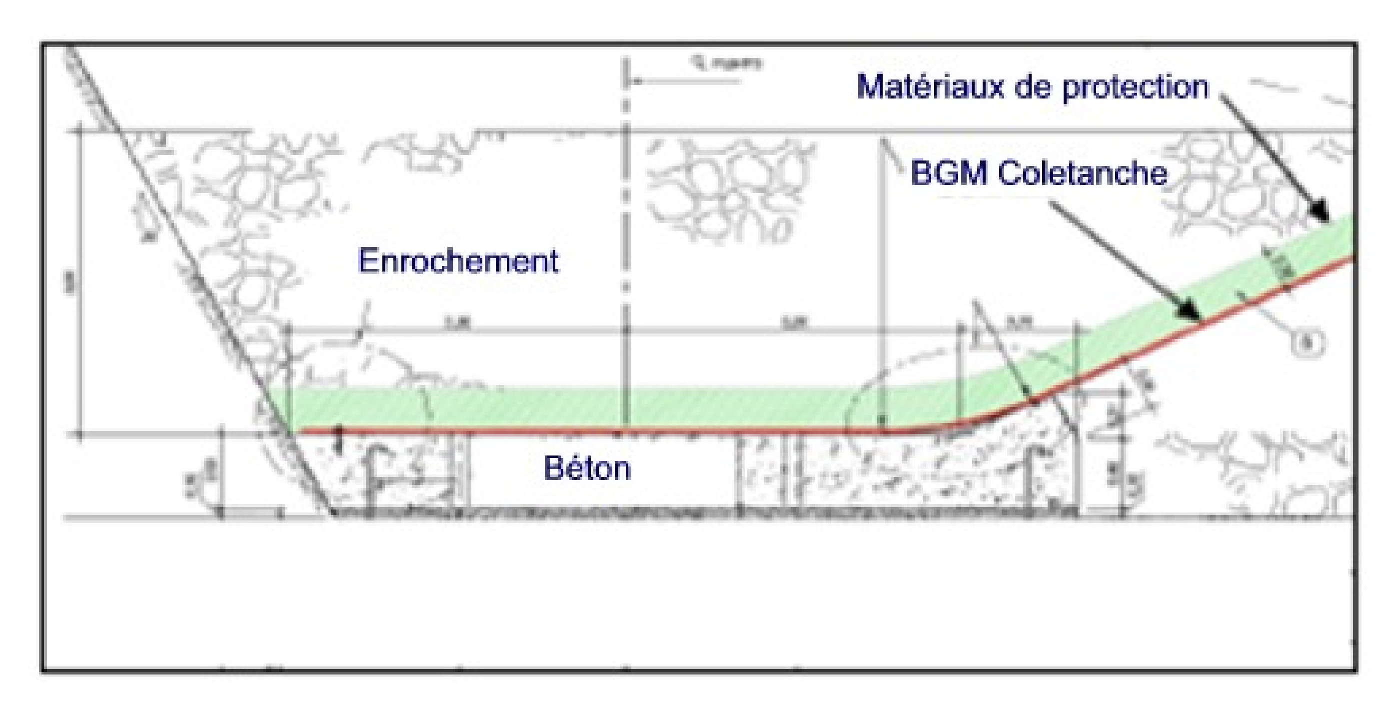


Figure 8. Détails de la transition entre le béton de la plinthe et le sol compacté, cas 1

L'ancrage de la géomembrane bitumineuse à la crête du barrage a été réalisé à 1 m de la rupture de pente et au moyen d'une tranchée excavée d'une largeur de 1 m et d'une profondeur de 0,6 m. Cette tranchée a ensuite été remplie de matériaux compactés soigneusement. La figure 9 montre l'ancrage des géomembranes bitumineuses ainsi que la couche de protection.

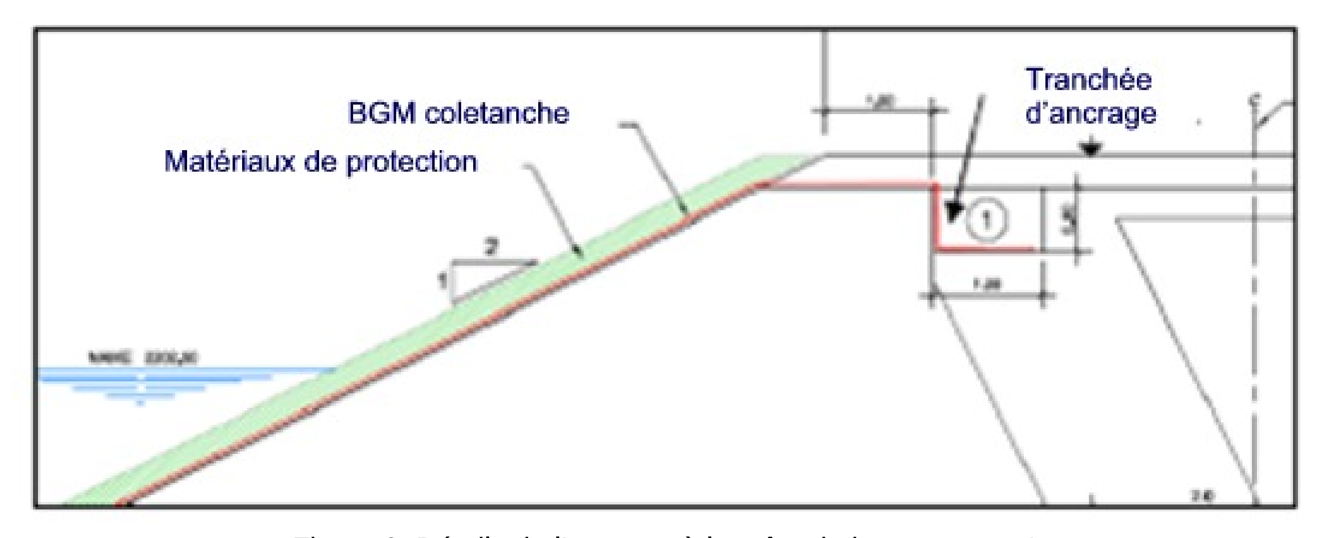


Figure 9. Détails de l'ancrage à la crête du barrage, cas 1

4.1.3. Contrôle de la qualité

Dans le cas 1, la totalité des joints entre les lés de BGM ont été testés sur le terrain au moyen d'un équipement à ultrasons. Les résultats obtenus ont été utilisés pour déterminer les besoins en réparation de soudure. Si on considère la taille du chantier, le nombre de réparations nécessaires a été faible.

4.2. Cas 2

4.2.1. Type de géomembrane

La géomembrane bitumeuse utilisée dans ce cas est indentique au cas 1. D'autre part, une géomembrane PEBD de 1,5 mm d'épaisseur a aussi été utilisée. Ses propriétés principales sont énumérées dans le tableau II.

Tableau II: Propriétés de la géomembrane PEBD

Propriété	Méthode d'essai	Valeur
Épaisseur (mm)	ASTM D 5199	1,5
Densité minimale (g/cm^3)	ASTM D 1505	0,92
Sollicitation à la rupture (N/mm)	ASTM D 6693	40
Allongement à la rupture (%)	ASTM D 6693	800
Résistance au poinçonnement (N)	ASTM D 4433	150

4.2.2. Pose, soudure et détails de construction

La caractéristique principale du second cas est le joint entre BGM et PEBD. Comme le démontre la figure 10, au moment des travaux, les deux types de géomembrane ont été boulonnés à l'intérieur d'une tranchée remplie de béton non armé.

Cette mesure a été mise en œuvre dans le but d'assurer la bonne performance du joint. Dans le fond de la tranchée excavée de 0,8 m x 0,8 m remplie de béton non armé, les boulons ont été fixés sur une dalle de béton. On a d'abord appliqué le primer sur la surface de béton, puis installé BGM, et finalement le géomembrane en PEBD. Sur cet assemblage, on a ajouté un autre morceau de géomembrane bitumineuse sur lequel on a installé une plaque en acier inoxydable.

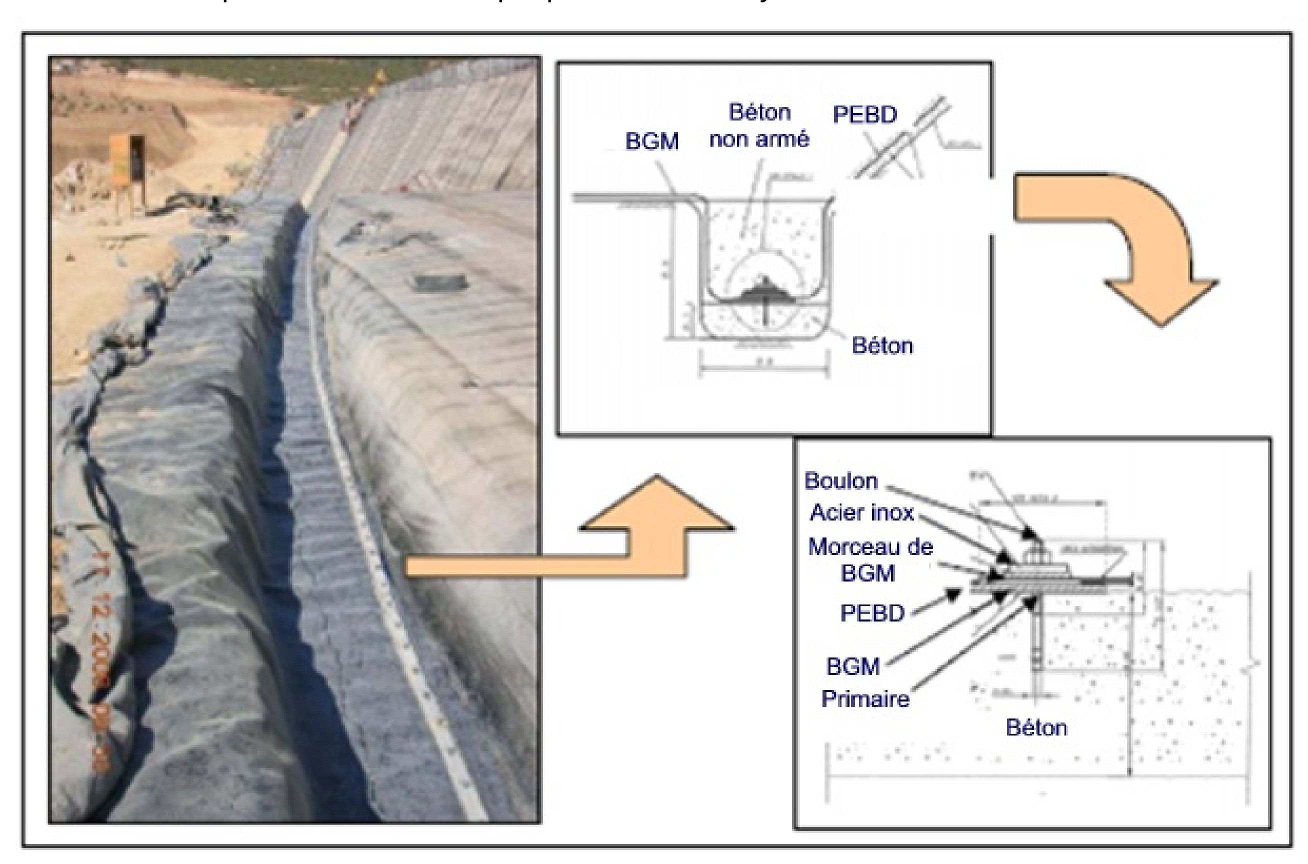


Figure 10. Détails du joint entre BGM et la géomembrane PEBD, cas 2

Tout le long du barrage, deux lignes d'ancrage horizontales forment le système de fixation de la géomembrane sur la surface de béton de l'ouvrage (résistance au vent de la géomembrane exposée).

La figure 11 montre les détails de ce système d'ancrage qui comprend des boulons, des plaques en acier inoxydable ainsi que des morceaux de géomembrane bitumineuse. Un chalumeau au gaz a été utilisé pour chauffer la zone autour du boulon en vue d'assurer l'étanchéité de l'assemblage boulon-géomembrane.

La figure 12 illustre les deux lignes d'ancrage horizontales sur la face amont du barrage.

Les figures 13 et 14 montrent les travaux effectués pour souder les lés de BGM. Premièrement, on a utilisé un chalumeau au gaz pour coller les lés de géomembranes et ensuite, au moyen d'un rouleau, une pression a été réalisée manuellement sur le joint (figure 13). La coulure (excès de bitume le long du joint) de bitume produite au moment de la soudure des deux lés a été de nouveau chauffée au moyen d'un chalumeau au gaz. L'étape finale de la soudure consiste à étendre manuellement le bitume chaud avec une truelle de façon à recouvrir le joint et à laisser un cordon de soudure de d'approximativement 6 mm le long du joint (figure 14).

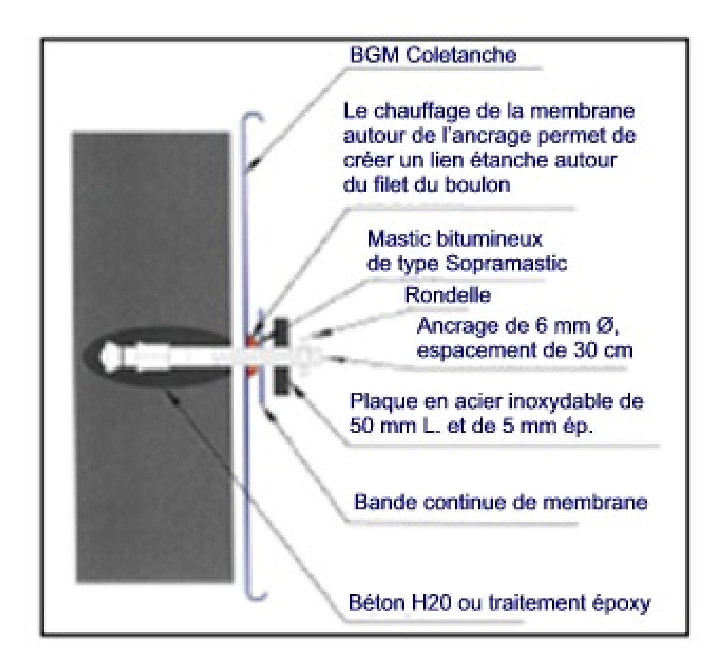


Figure 11. Détails du système d'ancrage de BGM sur la surface en béton, cas 2



Figure 12. Lignes d'ancrage horizontales des lés en BGM, cas 2



Figure 13. Soudure du joint



Figure 14. Finition du joint

Dans le second cas, une géomembrane PEBD a été utilisé à l'intérieur de la tranchée parafouille qui a été excavée jusqu'au substratum rocheux altéré. Cette géomembrane PEBD a été installée entre deux géotextiles sur une pente de 1(V) : 1,5(H) soit 34°. La masse surfacique du géotextile sous la géomembrane PEBD est de 400 g/cm2. Il a pour but de la protéger des irrégularités de surface causées par l'excavation du sol. La masse surfacique du géotextile qui recouvre la géomembrane PEBD est de 200 g/cm² et a pour fonction de la protéger du compactage du matériau imperméable de 2,5 m d'épaisseur. De plus, près de 4 m de matériaux imperméables ont été placés au fond de la tranchée. La figure 15 montre les détails des travaux de mise en œuvre susmentionnés.

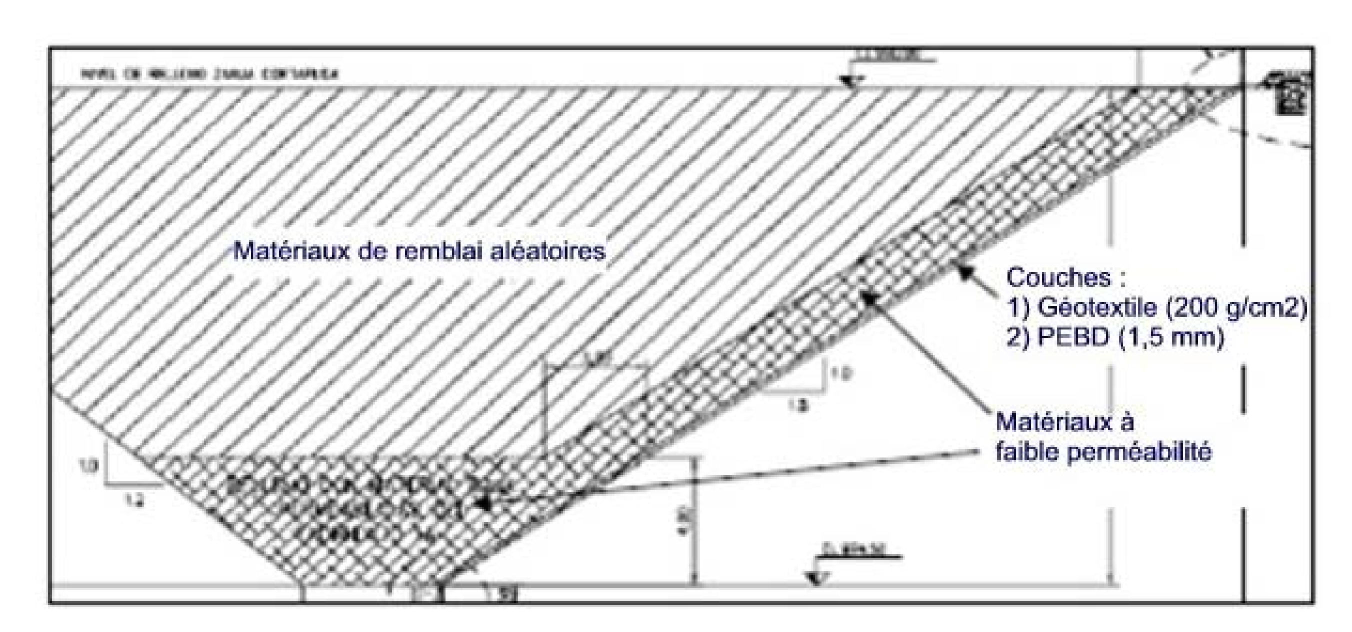


Figure 15. Détails de la tranchée avec la géomembrane PEBD

4.2.3. Contrôle de la qualité

Dans le cas 2, la totalité des joints entre les lés de BGM et entre BGM et la géomembrane PEBD ont été testés sur le terrain.

On a procédé à deux essais sur le terrain pour contrôler l'étanchéité des joints de géomembrane bitumineuse, soit au moyen d'une cloche à vide et d'un équipement à ultrasons. La figure 16 montre l'essai au moyen d'une cloche à vide sur la face amont du barrage.



Figure 16. Essai avec une cloche à vide sur les joints de la face amont du barrage, cas 2

Les résultats de tous les essais effectués ont été utilisés pour déterminer les zones á réparer. Vu la taille imposante du chantier, le nombre de réparations qui ont été nécessaires a été faible. À cet égard, il est intéressant de noter que les réparations sur les joints étaient pour la plupart situées sur la portion du haut de la surface du barrage, comme le démontre la figure 17.



Figure 17. Réparations sur la portion haute du barrage, cas 2

Avant le début des travaux de mise en œuvre, pour veiller à la qualité de l'installation et de la main-d'œuvre, tous les membres de l'équipe qui ont participé aux travaux ont été formés par un spécialiste fourni par le distributeur. La figure 18 montre la formation pratique.



Figure 18. Formation pratique des travailleurs, cas 2

5. Conclusions

Comme il a été démontré dans ce texte, les deux cas exposés ci-dessus pour l'étanchéité de barrages par une géomembrane BGM attestent le grand nombre d'utilisations possibles de ce type de produit, notamment pour étancher les barrages en terre qui ont une pente douce et les barrages en béton qui ont une pente verticale importante.

Les joints entre les lés de BGM présentent un avantage additionnel comparativement aux autres types de géomembranes. Comme il a été décrit précédemment, les joints ont été soudés à haute température au moyen d'un simple chalumeau au gaz. Il n'a pas été nécessaire de recourir à un équipement spécialisé, ce qui fait de ce type d'installation une activité simple. Dans les deux cas présentés, des travailleurs locaux ont été formés sur le terrain avant le début des travaux d'installation. Cette caractéristique permet de n'avoir qu'un seul superviseur spécialisé sur le chantier pendant les travaux de mise en œuvre.

Il faut noter aussi que, dans le cas 2, la pose de manière continue toute la journée malgré des températures de 30°C qui faisait arrêter le matin a 10.00 H un chantier contigu en PEHD (plis importants rendant impossible la soudure)

Il est important de noter que la construction de systèmes d'étanchéité représente toujours une dépense en immobilisations importante pour le propriétaire du barrage. Les auteurs recommandent fortement la mise en place d'un programme de contrôle de la qualité en vue de veiller à la qualité et à la durabilité du système d'étanchéité du barrage.

6. Références bibliographiques

Koerner R.M. (1998). Diseño con Geosintéticos, 4e éd., traduction IGS, Pérou, Lima, Pearson Education Inc., 2003.
Coletanche (2006). Manuel d'installation.
Golder Associates (2007). QA Field Reports.